مدل‌سازی فرایند فراصوت لیزری در رژیم دما-ارتجاعی به‌روش اجزای محدود*

مقاله پژوهشی

سلمان شمسایی[۱] **فرهنگ هنرور[۲]**

چکیده *در این مقاله، انتشار امواج فراصوتی حاصل از تابش پرتو لیزر به سطح یک جسم جامد در رژیم دما-ارتجاعی و تا آستانهٔ تبخیر ماده با استفاده از حل‌کننده کد-استر (Code-Aster) به‌صورت دوبعدی مدل‌سازی شده است. برخلاف مطالعات پیشین، مسئلهٔ فراصوت لیزری در دو مرحله و با مش‌ها و گام‌های زمانی متفاوت و مورد نیاز هر یک از بخش‌های تحلیل حرارتی و مکانیکی حل شده است که این امر باعث کاهش چشمگیری در زمان محاسبات شده است. انتشار امواج فراصوتی حاصل از تابش لیزر Nd:YAG با طول موج ۵۳۲ نانومتر، خیز پالس ۵ نانوثانیه و شدت لیزر حداکثر ۱۰ میلی‌ژول به‌صورت تابعی از زمان در کل قطعه محاسبه شده و موج‌های طولی و عرضی حاصل و نیز رفتار حرارتی ماده در اثر تابش پرتو بررسی شده است. زمان انجام محاسبات برای تحلیل‌های مجزای حرارتی و مکانیکی روی رایانه‌ای که برای این کار استفاده شد، جمعاً یکساعت و ۵۵دقیقه بوده است؛ درحالی‌که در تحلیل هم‌زمان، محاسبات حداقل ۱۱ساعت و ۲۹دقیقه طول می‌کشد. نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های آزمایشگاهی و عددی سایر محققان مقایسه شده است. تطابق خوب نتایج، درستی مدل‌سازی را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که کد موجود، رفتار حرارتی و مکانیکی فراصوت لیزری را به‌درستی و با سرعتی بیشتر از روش‌های پیشین محاسبه کرده است.*

واژه‌های کلیدی: لیزر، فراصوت، اجزای محدود، کد-استر، ارزیابی غیرمخرب.

مقدمه

آزمون فراصوت لیزری یکی از انواع آزمون‌های غیرمخرب فراصوتی است که از تابش پرتو لیزر برای تولید انواع موج‌های طولی، عرضی، سطحی و... همچنین دریافت آن‌ها برای بازرسی قطعات استفاده می‌کند. در فراصوت لیزری، برخلاف روش‌های سنتی، بازرسی بدون استفاده از مادهٔ واسط و به‌صورت غیرتماسی انجام می‌شود. در سال‌های گذشته این روش پیشرفتهٔ آزمون فراصوتی کاربردهای متنوعی در صنعت یافته است؛ مخصوصاً در بازرسی کامپوزیت‌های زمینهٔ پلیمری در صنایع هوافضا، ضخامت‌سنجی لوله‌های داغ فولادی در حین تولید و اندازه‌گیری و تعیین خصوصیات لایه‌های نازک در صنایع میکروالکترونیک[1]. به‌طورکلی، از فراصوت لیزری در یکی از ۲رژیم دما-ارتجاعی یا فرسایشی استفاده می‌شود. چنان‌چه قدرت لیزر پایین‌تر از آستانهٔ تبخیر ماده باشد، رژیم دما-ارتجاعی و درصورتی‌که قدرت لیزر به اندازه‌ای باشد که برداشت ماده را باعث شود، رژیم فرسایشی خواهد بود. مزیت رژیم فرسایشی نسبت به رژیم دما-ارتجاعی، تولید سیگنال‌های قوی‌تر و امکان بازرسی قطعات ضخیم، قطعات با دمای بالا و همچنین به‌کارگیری روش در شرایط و محیط‌هایی است که تضعیف موج فراصوتی زیاد است. اما باتوجه‌به آسیب جزئی سطح در رژیم فرسایشی، در بعضی کاربردها استفاده از آن پذیرفتنی نخواهد بود. در فراصوت لیزری معمولاً از لیزرهای CO_2 برای تولید موج استفاده می‌شود و امواج تولیدشده اغلب به‌وسیلهٔ اینترفرومتر فابری-پرو (Fabry-Perot) دریافت می‌شوند[2]. لیزرهای دیگری همچون Nd:YAG، Excimer و به‌میزان کمتری Nd-glass نیز با طول

* تاریخ دریافت مقاله ۹۹/۱/۳۱ و تاریخ پذیرش آن ۰۰/۲/۱۱ می‌باشد.

DOI: 10.22067/jacsm.2021.56657.0

(۱) دانشجوی دکتری، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: استاد، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

Email: honarvar@kntu.ac.ir

موج‌های مختلف برای ارزیابی غیرمخرب استفاده می‌شوند. ضریب جذب سطح و دامنهٔ موج‌های فراصوتی تولیدشده باتوجه‌به جنس نمونه و طول موج لیزرهای یادشده متفاوت است.

از اوایل دهه ۱۹٦۰، به استفاده از لیزر برای تولید امواج فراصوتی توجه شد[3]. لدبتر و مولدر[4] با تاباندن یک لیزر پالسی Nd-glass به یک قطعهٔ آلومینیمی نشان دادند که امواج طولی، عرضی و ریلی هم‌زمان در قطعه تشکیل می‌شوند. آن‌ها سپس سرعت این امواج را اندازه‌گیری و با مقادیری که با استفاده از سایر روش‌ها به‌دست‌آمده بود، مقایسه کردند. ویرت[5] به بررسی طیف فرکانسی امواج فراصوتی حاصل از لیزر پرداخت و با مقایسه با مدل تئوری، درستی نتایج خود را ارزیابی کرد. رود[6] روش فراصوت لیزری را با هر ۲مکانیزم دما–ارتجاعی و فرسایشی را مطالعه و برای دریافت امواج تولیدشده از روش‌های مختلف اینترفرومتری استفاده کرد. ایندو و همکاران[7] از یک لیزر Nd:YAG برای تولید امواج فراصوتی در یک نمونهٔ آلومینیمی و از یک لیزر He-Ne برای دریافت امواج و اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی سطح استفاده کردند. آن‌ها به کمک این روش توانستند هم عرض و هم عمق عیوب را اندازه‌گیری کنند. علاوه بر این، تحلیل داده‌ها نشان داد که این روش برای شناسایی عیوب تا عمق ٤ میلی‌متر زیر سطح مناسب و عملی است. هاچینز و همکاران[8] فراصوت لیزری را برای بازرسی مواد متخلخل به کار بردند. آن‌ها سرعت انتشار امواج طولی و عرضی تولیدشده با لیزر در مادهٔ متخلخلی از جنس سیلیس را پیش‌بینی کردند و میزان تضعیف موج را برحسب فرکانس بررسی و نتایج خود را با آزمایش‌های عملی مقایسه کردند. دوهرست و شان[9] از لیزری به‌قدرت ۲مگاوات برای تولید امواج طولی در قطعات آلومینیمی استفاده کردند. آن‌ها عیوبی مصنوعی در قطعات آلومینیمی ایجاد کردند و با استفاده از اینترفرومتر فابری–پرو و به‌روش عبوری، عیوب سوراخ و لایه‌لایه‌شدگی را بررسی کردند. روير و چنو[10] مدلی تحلیلی را برای بررسی شکل امواج ریلی تولیدشده با استفاده از منبع خطی لیزر در رژیم دما–ارتجاعی در یک قطعهٔ همسانگرد از جنس آلومینیم توسعه دادند. آن‌ها شکل لیزر را به‌صورت گوسی فرض کردند و یک رابطهٔ تحلیلی برای جابه‌جایی نرمال در منطقهٔ نزدیک و دور از منبع خطی لیزر ارائه و آن را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. کلارنک و همکاران[11] برای شناسایی شکاف‌های کوچک سطحی در یک سیلندر فولادی به‌قطر ۲۵میلی‌متر، از روش فراصوت لیزری استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از امواج ریلی ایجادشده با لیزر روی سطح، توانستند ترک‌هایی را با حداقل عمق ۰/۰۸میلی‌متر که در مقایسه با طول‌موج ریلی (۲میلی‌متر) بسیار کوچک‌تر بود، شناسایی کنند. استراتوداکی و همکاران[2] ۳لیزر CO_2، Nd:YAG و XeCl را برای تولید امواج فراصوتی در اپوکسی رزین در هر ۲رژیم فرسایشی و دما–ارتجاعی به‌صورت تجربی مقایسه و مقدار جذب انرژی و دامنهٔ امواج را ارزیابی کردند. کارابوتو و همکاران[12] از روش فراصوت لیزری برای تعیین اندازهٔ تنش‌های پسماند در جوش استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از یک لیزر Nd:YAG با انرژی پالس ۱۰۰میکروژول و مدت پالس ۷نانوثانیه ابتدا سرعت صوت را در یک نمونهٔ بدون جوش اندازه گرفتند و سپس با مقایسهٔ مقادیر اولیه و مقادیر اندازه‌گیری‌شدهٔ سرعت صوت در نمونهٔ جوش‌داده‌شده، میزان تنش‌های پسماند را محاسبه کردند. وو و همکاران[13] برای دریافت امواج فراصوتی تولیدشده با لیزر از تراگذارهای پیزوالکتریک یکپارچه استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از تکنیک اسپری سول–ژل (Sol-gel) فیلم‌های پیزوالکتریکی، به‌ضخامت تقریبی ۵۰میکرومتر، ساختند و مستقیم روی سطح قطعات آزمایش‌شده ازجمله فولاد و آلومینیم قرار دادند و توانایی این تراگذارهای یکپارچه برای شرایط مختلف تولید پالس لیزر روی سطوح منحنی در دماهای بالا (حداکثر ٤۰۰درجه سانتی‌گراد) را نشان دادند. پی و همکاران[14] با استفاده از روش سایه، به

ارزیابی ترک پرداختند و موج فراصوتی تولیدشده با لیزر را با روش اجزای محدود مدل‌سازی و نتایج عددی خود را با آزمایش‌های عملی صحت‌سنجی کردند. ریسه و همکاران [15] تأثیر تغییر فاز و تشکیل حوضچه مذاب را روی امواج برشی حاصل از لیزر بررسی کردند.

اوری و همکاران [16] تولید امواج دما–ارتجاعی فراصوتی در ورق فلزی از جنس تنگستن را به ۲روش مختلف، یکی براساس توابع الاستودینامیک گرین و دیگری با استفاده از روش اجزای محدود، حل کردند. آن‌ها به‌تدریج توان لیزر را تا آستانهٔ تبخیر افزایش دادند و گرادیان دمایی، جابه‌جایی، تنش‌های سطحی، عمق حوضچهٔ مذاب و همچنین تأخیر زمانی موج برشی را در حالت مذاب پیش‌بینی کردند. ونگ و همکاران [17] انتشار امواج لمب (Lamb) تولیدشده با لیزر در صفحات کریستالی را به‌صورت دوبعدی مدل‌سازی کردند. کیو و لاأو[18] حساسیت تکنیک فراصوت لیزری در تشخیص عیوب نزدیک به سطح، مخصوصاً در بتن تقویت‌شده با چسباندن پلیمرهای مسلح‌شده با الیاف کربن را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. رویینگ و همکاران[19] به بازرسی قطعات داغ با استفاده از فراصوت لیزری به‌صورت عملی و همچنین با استفاده از روش اجزای محدود پرداختند و دریافتند که سرعت و دامنهٔ امواج سطحی با افزایش دما کم می‌شود. کازالینو و همکارانج [20] با استفاده از لیزر پالسی Nd:YAG سخت‌سازی سطح فولاد AISI 4130 را به‌صورت عددی و تجربی بررسی کردند. مرادی و همکاران[21] به‌بررسی تأثیر پارامترهای فرایند برش‌کاری با لیزر پیوسته CO_2 با استفاده از روش آماری تحلیل واریانس بر روی ورقی از جنس پلی‌کربنات پرداختند. جی و همکاران[22] از روشی مبتنی بر امواج حجمی فراصوت لیزری، برای تشخیص عیب لایه‌لایه‌شدگی در کامپوزیت‌های دوفلزی استفاده کردند و با آزمایش‌های عملی نتایج روش اجزای محدود را قوت بخشیدند.

در این مقاله، فراصوت لیزری در رژیم دما–ارتجاعی (تا آستانهٔ تبخیر ماده) به‌روش اجزای محدود مدل‌سازی و رفتار حرارتی ماده در اثر تابش پرتو لیزر و همچنین نحوهٔ انتشار موج فراصوتی ایجادشده بررسی می‌شود. شبیه‌سازی به‌صورت دوبعدی و برای یک لیزر Nd:YAG با طول موج ۵۳۲نانومتر و خیز پالس ۵نانوثانیه و شدت حداکثر ۱۰میلی‌ژول بر روی ماده‌ای از جنس تنگستن تحلیل می‌شود. باتوجه‌به زمان زیاد محاسبات در فرایند فراصوت لیزری، مخصوصاً در بازرسی قطعات ضخیم و باتوجه‌به یکسان‌نبودن اجزا و گام‌زمانی مورد نیاز برای حل بخش‌های حرارتی و مکانیکی مسئله، قسمت حرارتی و مکانیکی به‌طور مجزا مدل‌سازی و تأثیر آن در کاهش زمان محاسبات بررسی می‌شود. ابتدا اندازهٔ اجزا و گام‌زمانی مورد نیاز برای حل مسئلهٔ حرارتی با تکرار تحلیل به‌دست می‌آید و سپس نتایج به‌دست‌آمده به‌عنوان بار ورودی در تحلیل مکانیکی به‌کار می‌رود و نتیجه با مقایسه با دیگر نتایج عددی و آزمایشگاهی صحت‌سنجی می‌شود. علاوه‌براین، قابلیت برنامهٔ محاسباتی کد–استر در مدل‌سازی فرایند فراصوت لیزری در رژیم دما–ارتجاعی نیز ارزیابی می‌شود.

تولید فراصوت لیزری در رژیم دما–ارتجاعی

هنگامی که پرتو لیزر به سطح یک جسم همسانگرد برخورد می‌کند، مقداری از انرژی الکترومغناطیس پرتو از طریق سطح جذب و سطح جسم گرم می شود. این انتقال حرارت با رابطهٔ زیر بیان می‌شود[23]:

$$\rho C_p \frac{\partial T(x,y,t)}{\partial t} = \nabla(k \nabla T(x,y,t)) + Q \quad (1)$$

که در آن T(x,y,t) توزیع دما در زمان t ، y راستای عمق و x امتداد طول قطعه است. ρ ،C_p و k به‌ترتیب ظرفیت گرمای ویژه، چگالی و رسانندگی گرمایی در فشار ثابت هستند و Q چگالی انرژی منبع حرارتی است. از آن‌جا

که پالس لیزر، به‌جای منبع حرارتی معمولاً به‌صورت شار حرارتی عمل می‌کند (Q=۰)، معادلهٔ (۱) می‌تواند به‌صورت زیر ساده‌سازی شود[23,24]:

$$\rho C_p \frac{\partial T(x,y,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(k\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial y}) \quad (۲)$$

شرایط مرزی نیز به‌صورت زیر است[23,24]:

$$-k\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial y}\bigg|_{y=h} = E(1-R)f(x)g(t),$$

$$\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial y}\bigg|_{y=o} = 0 \quad (۳)$$

که در آن E انرژی پالس لیزر برحسب ژول، R ضریب انعکاس سطح و f(x) و g(t) به‌ترتیب توزیع فضایی و زمانی پرتو لیزر هستند. y=h متناظر با سطح رویی و y=۰ متناظر با سطح زیرین و h ضخامت قطعه است.

انرژی جذب شدهٔ لیزر سبب انبساط آنی سطح و درنتیجه ایجاد تنش و متعاقب آن منجر به جابه‌جایی سطح و تولید امواج فراصوتی می‌شود. معادله جابه‌جایی عبارت است از [24,25]:

$$(\lambda+2\mu)\nabla(\nabla U) - \mu\nabla\times\nabla\times U -$$

$$(3\lambda+2\mu)\alpha\nabla T(x,y,t) = \rho\frac{\partial^2 U}{\partial^2 t} \quad (٤)$$

که در آن U جابه‌جایی وابسته به زمان، μ و λ ثوابت لامه، و α ضریب انبساط حرارتی خطی است.

مدل‌سازی مسئله به‌روش اجزای محدود. با درنظرگرفتن ارتباط مستقیم بین جابه‌جایی گره‌ها {U} و حرارت {T} و باتوجه‌به ماتریس ظرفیت گرمایی ویژه $[C_p]$، ماتریس رسانندگی گرمایی $[K_T]$، بردار شار حرارتی $\{p_1\}$ و بردار منبع حرارتی $\{p_2\}$، معادلهٔ کلاسیک حرارت را می‌توان به‌صورت زیر نوشت[26,27]:

$$[K_T]\{T\} + [C_p]\{\dot{T}\} = \{p_1\} + \{p_2\} \quad (۵)$$

که در آن {T} دما و $\{\dot{T}\}$ نرخ افزایش دماست. برای انتشار موج، با صرف‌نظر از میرایی، معادلهٔ اجزای محدود به‌صورت زیر است [٢٦ و ٢٧]:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{F_{ext}\} \quad (٦)$$

که در آن [M] ماتریس جرم، [K] ماتریس سفتی، {U} بردار جابه‌جایی ، $\{\ddot{U}\}$ بردار شتاب و $\{F_{ext}\}$ بردار نیروی خارجی است. در حالت دما-ارتجاعی، بردار نیروی خارجی برای یک جزء برابر است با [٢٦ و ٢٧]:

$$\{F_{ext}\} = \int_{V_e}[B]^T[D]\{\varepsilon_0\}dV \quad (۷)$$

که در آن $\{\varepsilon_0\}$ بردار کرنش حرارتی، $[B]^T$ ترانهاده ماتریس کرنش-تغییرمکان و [D] ماتریس ماده است.

شبیه‌سازی عددی

برای انجام محاسبات به‌روش اجزای محدود و عملیات پیش‌پردازش و پس‌پردازش از نرم‌افزار سالومه‌مکا (Salome-Meca) استفاده شد. سالومه‌مکا نرم‌افزار یکپارچه متن‌بازی است که از پلت‌فرم سالومه برای عملیات پیش‌پردازش و پس‌پردازش و از حل‌کننده کد-استر برای محاسبات عددی بهره می‌گیرد. کد-استر فرایندهای کوپل حرارتی‌مکانیکی را به‌صورت مجزا حل می‌کند، بدین‌ترتیب که ابتدا باید محاسبات مربوط به قسمت حرارتی مسئله انجام شود و سپس خروجی حاصل از مرحله اول در تحلیل مکانیکی بارگذاری شود. مزیت تحلیل مجزای حرارتی و مکانیکی هنگامی مطلوب است که مش مورد نیاز و گام‌زمانی برای حل مسئلهٔ

تحلیل حرارتی و تحلیل مکانیکی متفاوت باشد. دراین‌صورت، هرکدام از تحلیل‌ها می‌تواند با مش مجزا و گام‌زمانی متفاوت محاسبه شود تا زمان محاسبات کم شود. حل مسئله با کد-استر این مزیت را نیز دارد که دستورات کد-استر که کاربر برای حل مسئله می‌نویسد، یک کد به زبان پایتون است و کاربر می‌تواند محاسبات ریاضی، دستورات شرطی پایتون، ایجاد حلقه و... را به‌راحتی در تحلیل خود بگنجاند.

برای حل مسئله انتشار موج فراصوتی در اثر تابش پرتو لیزر، محاسبات به ۲قسمت حرارتی و مکانیکی تقسیم و برخلاف روش معمول از مش متفاوتی برای این ۲تحلیل استفاده شد. در قسمت اول، تابش پالس لیزر به سطح جسم مدل‌سازی و توزیع دما در جسم به صورت تابعی از زمان محاسبه شد. در قسمت دوم، نتایج تحلیل حرارتی به‌صورت بار ورودی در تحلیل مکانیکی استفاده شد و جابه‌جایی ذرات در اثر انبساط آنی سطح و تشکیل موج فراصوتی به صورت دینامیکی بررسی شد.

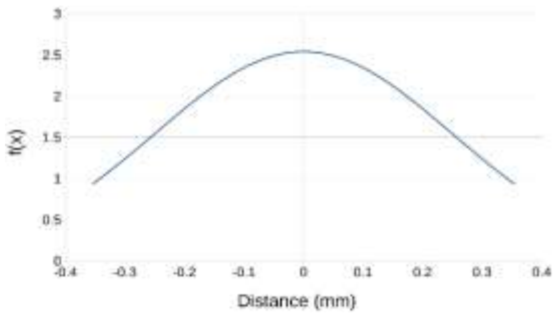
برای فراهم‌کردن شرایط مقایسهٔ نتایج تحلیل حرارتی با مرجع[16] از یک لیزر Nd:YAG با خیز پالس ۵نانوثانیه و شعاع لکهٔ ۰/۳۵٤میلی‌متر برای محاسبات اجزای محدود استفاده شد. موج لیزر به صورت گوسی فرض و توزیع حرارت منبع لیزر روی سطح مطابق معادلهٔ زیر مدل شد[24,28,29]:

$$q = E(1-R)\,f(x)\,g(t) \qquad (۸)$$

برای مدل‌سازی توزیع مکانی لیزر روابط مختلفی در تحقیقات گذشته گزارش شده است. رابطهٔ زیر برای مدل‌سازی توزیع گوسی پرتو لیزر استفاده شد [14,16, 24,30]:

$$f(x) = \frac{1}{\pi r_0^2}\exp\left(\frac{-x^2}{r_0^2}\right) \qquad (۹)$$

که در آن r_0 شعاع لکهٔ لیزر است. توزیع فضایی حاصله برای لکهٔ لیزری با شعاع ۰/۳۵٤میلی‌متر در شکل ۱ نشان داده شده است.

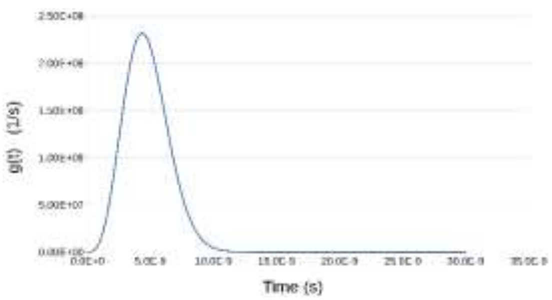


شکل ۱ توزیع مکانی پالس لیزر با شعاع لکهٔ ۰/۳۵٤میلی‌متر

علاوه بر توزیع مکانی پرتو بر روی سطح، شکل پالس لیزر به‌صورت تابعی از زمان نیز باید مدل شود. معادلات متفاوتی برای مدل‌سازی شکل زمانی پرتو لیزر ارائه شده است. یکی از روابطی که بدین منظور می‌توان استفاده کرد، عبارت است از [29,31]:

$$g(t) = \frac{8t^3}{t_0^4}\exp\left(\frac{-2t^2}{t_0^2}\right) \qquad (۱۰)$$

که در آن t_0 زمان خیزپالس لیزر است. توزیع زمانی به‌دست‌آمده از معادلهٔ (۱۰) برای خیزپالس ۵نانوثانیه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ توزیع زمانی پالس لیزر با خیزپالس ۵نانوثانیه

برای تعریف رفتار حرارتی هنگام ذوب ماده و تغییرات انرژی داخلی سیستم و همچنین درنظرگرفتن گرمای نهان ذوب، معادلهٔ زیر استفاده شد[16]:

$$C_p(T) = C_0 + L_f f(T) \tag{۱۱}$$

که در آن C_0 ظرفیت گرمای ویژه در دمای اتاق، L_f گرمای نهان ذوب و $f(T)$ برابر است با [16]:

(۱۲)

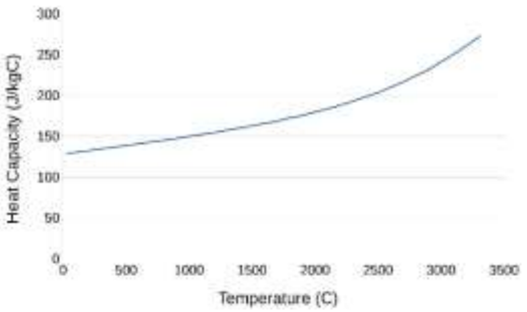
$$f(T) = \begin{cases} \{1+\cos(\pi(T-T_m)/100)\}/200, & |T-T_m| < 100^\circ C \\ 0, & |T-T_m| > 100^\circ C \end{cases}$$

در معادلهٔ (۱۲) T_m نقطهٔ ذوب ماده است. ماده به‌کاررفته در این تحقیق تنگستن است که مشخصات آن در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱ مشخصات حرارتی و مکانیکی تنگستن [16]

مدول یانگ	Y (GPa)	۴۰۸
ضریب پواسون	ν	۰/۲۸
چگالی	ρ (kg/m^3)	۱۹۳۰۰
ضریب انبساط حرارتی خطی	α(C^{-1})	۴/۳ ×۱۰$^{-۶}$
سرعت موج طولی	c_L (m/s)	۵۵۷۰
سرعت موج عرضی	c_T (m/s)	۳۰۸۹
نقطه ذوب	°C	۳۴۱۰
گرمای نهان ذوب	J/kg	۱۸۴۰۰۰
رسانندگی گرمایی	W/m°C	۱۷۳

ظرفیت گرمای ویژه به‌صورت وابسته به زمان درنظر گرفته شد که تغییرات آن مطابق شکل ۳ است[32]. به‌علت دردسترس‌نبودن مقادیر ظرفیت گرمای ویژه در دماهای بالاتر از دمای ذوب، مقدار آن در ناحیهٔ ذوب مستقل از حرارت و ثابت فرض شد. با شدت لیزری برابر با ۱۰میلی‌ژول، دمای سطح تا مرز تبخیر ماده بالا می‌رود. برای ساده‌سازی، گرمای نهان تبخیر در محاسبات لحاظ نشد. همچنین رسانندگی گرمایی مستقل از دما فرض شد.



شکل ۳ تغییرات ظرفیت گرمای ویژه وابسته به دما برای تنگستن [32]

محاسبات به‌صورت دوبعدی بر روی قطعه‌ای از جنس تنگستن به ابعاد ۳/۱۲ × ۸میلی‌متر مربع انجام و به‌دلیل تقارن مسئله در راستای محور طولی، فقط نیمی از قطعه مدل شد.

اندازهٔ اجزا در تحلیل اجزای محدود از اهمیت خاصی برخوردار است و هم‌گرایی نتایج هنگامی حاصل می‌شود که اندازهٔ اجزا به‌اندازهٔ کافی کوچک باشد. از طرف دیگر، بیش از اندازه کوچک‌بودن اجزا نیز زمان محاسبات را افزایش می‌دهد. بنابراین، اندازهٔ مورد نیاز اجزا در منطقهٔ تابش پرتو و منطقهٔ دور از لیزر، باید محاسبه شود. به‌طورکلی حداکثر اندازهٔ اجزا باید به‌گونه ای انتخاب شود که دست‌کم ۱۰گره در یک طول موج داشته باشیم [۳۰]. حداکثر اندازهٔ اجزا برابر است با[33]:

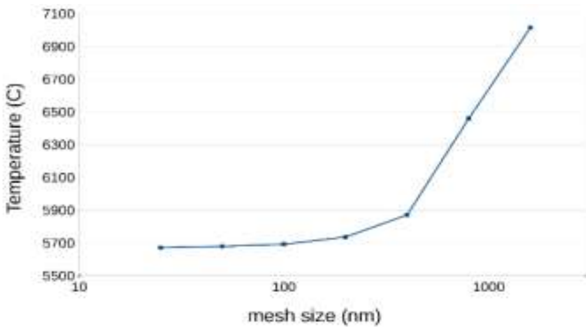
$$L_e \leq \frac{1}{10}\frac{C}{f_{max}} \tag{۱۳}$$

که در آن L_e اندازهٔ جزء، C حداکثر سرعت موج در ماده و f_{max} حداکثر فرکانس موج فرا صوتی است که از

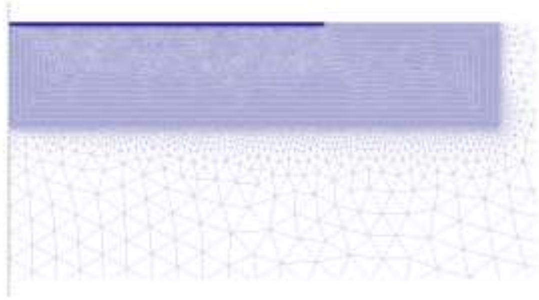
معادلهٔ زیر به‌دست می‌آید[33]:

$$f_{max} = \frac{2\sqrt{2}\,C}{\pi r_0} \tag{14}$$

با استفاده از معادلات (۱۳) و (١٤)، اندازهٔ اجزا باید کوچک‌تر یا مساوی ۳۹/۳میکرومتر باشد و هر چقدر چگالی انرژی لیزر بیشتر شود، این مقدار کمتر خواهد شد. مقدار مورد نیاز با تکرار تحلیل و کاهش تدریجی اجزا به‌دست خواهد آمد. مقدار محاسبه‌شده ۳۹/۳ میکرومتر برای منطقهٔ دور از لیزر بود، اما باتوجه‌به چگالی زیاد انرژی لیزر (آستانهٔ تبخیر ماده)، اجزای منطقه حرارت‌دیده باید به‌اندازه‌ای کوچک باشند که نتایج دمایی، دقت و هم‌گرایی کافی را داشته باشند. بنابراین، تحلیل مدنظر چندبار با اندازهٔ اجزای کوچک‌تر تکرار شد [34,35] و نتایج هنگامی هم‌گرا شدند که اندازهٔ اجزای منطقهٔ نزدیک به لیزر به ۱۰۰نانومتر رسید (شکل٤). برای منطقهٔ دور از لیزر نیز تحلیل چندین‌بار تکرار شد و هربار، المان‌های منطقهٔ دور کمی بزرگ‌تر شدند و مشاهده شد که با اجزایی با اندازهٔ ۳۰میکرومتر یا کمتر، نتایج تغییری نمی‌کند. تعداد کل گره‌ها در تحلیل حرارتی ۲۲۲۱۵۹ گره است. شکل ٥–الف قسمتی از مش مربوط به تحلیل حرارتی را که در منطقهٔ نزدیک به لیزر قرار دارد، نشان می‌دهد.



شکل٤ رابطهٔ اندازه اجزا در منطقهٔ نزدیک به لیزر با دما برای نقطه ای در بالای سطح و در مرکز تابش پرتو لیزر با توان ۱۰میلی‌ژول و خیزپالس ٥نانوثانیه



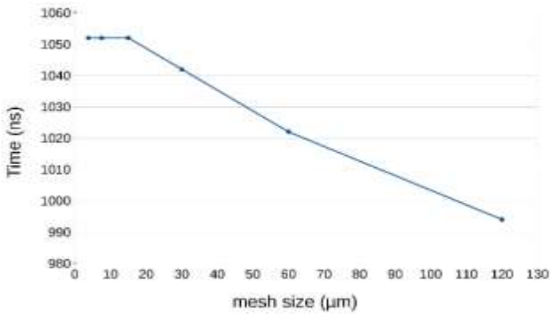
الف)



ب)

شکل ٥ مش‌بندی مدل در منطقهٔ تابش لیزر مربوط به: الف) تحلیل حرارتی، ب) تحلیل مکانیکی

تحلیل مکانیکی به چنین مش‌ریزی‌ای نیاز ندارد. همان طور که در شکل ٦ مشاهده می‌شود، با کاهش اندازهٔ اجزا تا ١٥میکرومتر، زمان رسیدن موج عرضی به کف قطعه به‌تدریج افزایش می‌یابد و پس از آن ثابت می‌ماند. بنابراین از اجزایی با اندازهٔ ١٥میکرومتر برای انجام تحلیل مکانیکی استفاده شد. تعداد گره‌ها در تحلیل مکانیکی ١١٦٠٤٠ گره است. قسمتی از مش استفاده‌شده در این تحلیل در شکل ٥–ب نشان داده شده است.



شکل ٦ رابطهٔ اندازهٔ اجزا با زمان رسیدن موج عرضی به کف قطعه در تحلیل مکانیکی

عامل مؤثر دیگر در زمان انجام محاسبات و همچنین دقت محاسبات اجزای محدود، اندازهٔ گام‌زمانی برای حل مسئله است. حداکثر اندازهٔ گام‌زمانی از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید[۳۳]:

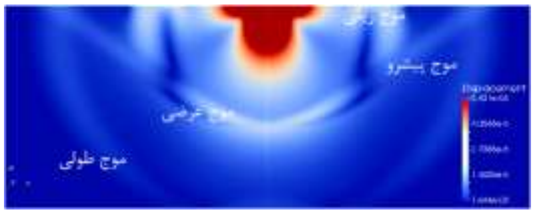
$$\Delta t \le \frac{L_e}{C\sqrt{3}} \qquad (۱۵)$$

باتوجه‌به سرعت موج طولی در تنگستن(۵۵۷۰ m/s) و مقدار L_e محاسبه‌شده از رابطهٔ (۱۳)، گام‌زمانی ٤/۰۷نانوثانیه برای حل مسئله به‌دست آمد. گام‌زمانی محاسبه‌شده، برای توان‌های پایین لیزر مناسب است. هرچقدر چگالی انرژی لیزر بیشتر شود، گام‌زمانی کوچک‌تری برای حل مسئله لازم خواهد بود. برای لیزر ۳/۹میلی‌ژول، با گام‌زمانی ۱۰۰پیکوثانیه، نتایج هم‌گرا شدند. محاسبات مربوط به لیزر ۱۰میلی‌ژول با گام‌زمانی ۵۰پیکوثانیه انجام شد. مرحله خنک‌کاری با گام‌زمانی بزرگ‌تر از مقدار محاسبه‌شده تکرار شد و تغییری در نتایج مشاهده نشد. بنابراین، از گام‌زمانی ۱۱/۵نانوثانیه برای این مرحله استفاده شد. تحلیل مکانیکی به‌صورت صریح انجام و از گام‌زمانی ۲نانوثانیه برای محاسبات مربوط به جابه‌جایی گره‌ها و تشکیل موج فراصوتی استفاده شد. انتشار موج فراصوتی تا ۱۱۸۰نانوثانیه پس از شلیک لیزر مدل‌سازی شد. زمان تحلیل حرارتی و مکانیکی با سیستم‌عامل متن‌باز اوبونتو۱٦/۰٤ (توزیعی از لینوکس برپایهٔ دبیان)، پردازندهٔ core i7-6700HQ 2.6 GHz × 8 و حافظه رم ١٦ GB به‌ترتیب ٤٧ و ٦٨دقیقه بود. استفاده از مش متفاوت و همچنین گام‌زمانی مجزا برای هر یک از ۲تحلیل حرارتی و مکانیکی باعث شد مسئله انتشار موج در زمان کوتاهی قابل مدل‌سازی باشد. برای مقایسه، یک‌بار دیگر محاسبات حرارتی و مکانیکی با گام‌زمانی و مش یکسان مورد نیاز برای این ۲تحلیل تکرار و مشاهده شد که زمان تحلیل چندین برابر حالت قبل خواهد بود. حل حرارتی ۲ساعت و ۷دقیقه طول کشید و تحلیل مکانیکی پس از ۱۱ساعت و ۲۹دقیقه به پایان رسید. اختلاف نتایج در حل مکانیکی ۰/٦درصد و در تحلیل حرارتی فقط ۰/۱درصد بود. در مطالعات قبلی محققان دیگر، تحلیل حرارتی و مکانیکی برای حل مسئله فراصوت لیزری، به‌صورت هم‌زمان و در یک مرحله گزارش شده است که این امر نشان‌دهنده آن است که آن‌ها از گام‌زمانی و مش یکسانی در انجام محاسبات استفاده کرده‌اند[33 ,29-32 ,23-27 ,14] . باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل فرایند فراصوت لیزری، مشخص شد که مش و گام‌زمانی مورد نیاز برای انجام هر یک از ۲مدل حرارتی و مکانیکی تفاوت زیادی با یکدیگر دارند. ابعاد قطعه در تحقیق حاضر بسیار کوچک است (٤ × ۳/۱۲میلی‌متر) و هنگامی که قرار باشد مدلی با ابعادی بزرگ‌تر تحلیل شود، زمان محاسبات بسیار حائز اهمیت خواهد بود. بنابراین فراصوت لیزری و فرایندهای مشابه باید در ۲مرحله و با گام‌زمانی و مش متفاوت و مورد نیاز تحلیل شوند تا با کاهش زمان محاسبات، استفاده از روش اجزای محدود برای حل مسئله، از نظر اقتصادی نیز پذیرفتنی باشد.

بحث و نتایج

با انجام مدل‌سازی، چگونگی رفتار حرارتی ماده و انتشار موج فراصوتی حاصل از تابش پرتو لیزر Nd:YAG با طول موج ۵۳۲نانومتر، خیزپالس ۵نانوثانیه و شعاع لکهٔ ۰/۳٥٤میلی‌متر روی قطعه‌ای از جنس تنگستن به‌دست آمد. با شلیک لیزر، دمای سطح در کسری از ثانیه افزایش چشمگیری می‌یابد. این شوک حرارتی، انبساط آنی سطح و درنتیجه تولید موجی الاستیک با فرکانسی در محدودهٔ فراصوت را در پی دارد. در فراصوت لیزری با یک‌بار شلیک پرتو لیزر، انواع موج‌های طولی، عرضی، ریلی و پیشرو در قطعه تشکیل می‌شود و براساس نوع عیب موجود در قطعه، یک یا چند نوع از این امواج می‌تواند برای بازرسی قطعه استفاده شود. شکل ۷ موج حاصل از شلیک پرتو لیزر با مشخصات ذکرشده و توان

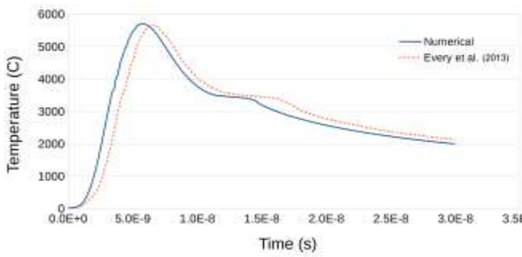
۱۰میلی‌ژول را نشان می‌دهد و تشکیل هم‌زمان این موج‌ها در داخل قطعه را تأیید می‌کند.



شکل ۷ میدان فراصوتی ایجادشده در زمان ٦٤٠نانوثانیه پس از تابش لیزر با توان ۱۰میلی‌ژول و خیزپالس ٥نانوثانیه

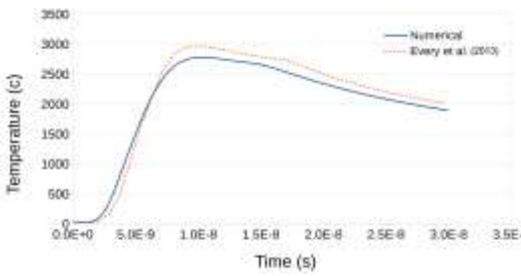
همان‌طورکه در شکل ۷ مشاهده می‌شود، موج طولی با زاویهٔ تقریبی ٦٠درجه و موج عرضی با سرعتی کمتر و شدتی بیشتر با زاویه تقریبی ۳۰درجه نسبت به خط عمود درحال انتشار است. موج پیشرو موجی است که از نقطهٔ تقاطع موج طولی با سطح آغاز می‌شود و امتداد آن با موج عرضی مماس می شود. موج ریلی نیز که با سرعتی کمتر از سرعت موج برشی در روی سطح جسم انتشار می‌یابد، در شکل ۷ مشاهده می‌شود.

تغییرات درجه‌حرارت به‌صورت تابعی از زمان برای ۲نقطه از جسم در زیر مرکز محل تابش لیزر ۱۰ mJ با حداکثر توان ۲۲۸ MW/cm^2 و چگالی انرژی حداکثر ۲٥٤۰۰ J/m^2، یکی در روی سطح و دیگری در عمق ٤٧٦نانومتر زیر سطح استخراج و با نتایج عددی اوری و همکاران [16] مقایسه شد (شکل‌های ۸ و ۹).



شکل ۸ تغییرات دما با زمان برای نقطه‌ای در بالای سطح و در مرکز تابش پرتو لیزر با توان ۱۰ میلی‌ژول و خیزپالس ٥ نانوثانیه

با تابش پرتو لیزر، دما به‌سرعت افزایش می‌یابد. بعد از ٥/٧نانوثانیه دمای سطح به حداکثر مقدار خود می‌رسد و پس از آن به‌تدریج کاهش می‌یابد. شکستگی منحنی در شکل ۸ در زمان تقریبی ۳نانوثانیه، به‌دلیل تغییر فاز از جامد به مایع و همچنین اثرات گرمای نهان ذوب است. درحقیقت در این زمان، انرژی جذب‌شده لیزر دمای جسم را تغییر نمی‌دهد و این انرژی به‌طور کامل صرف تغییر فاز از جامد به مایع می‌شود. اما باتوجه‌به چگالی بالای انرژی لیزر و زمان خیزپالس کوتاه لیزر (٥نانوثانیه)، تغییر فاز از جامد به مایع بسیار سریع اتفاق می‌افتد و به‌سختی در شکل ۸ قابل مشاهده است. شکستگی دوم نمودار هنگام سردشدن قطعه که در زمان‌های بین ۱۱ تا ١٤نانوثانیه مشاهده می‌شود، مربوط به تغییر فاز از مایع به جامد است. همان‌طورکه در شکل ۸ دیده می‌شود، نتایج به‌دست‌آمده تطابق خوبی با نتایج مرجع[١٦] دارد.



شکل ۹ تغییرات دما با زمان برای نقطه‌ای در عمق ٤٧٦ نانومتر و در مرکز تابش پرتو لیزر با توان ۱۰ میلی‌ژول و خیزپالس ٥ نانوثانیه

تغییرات درجه‌حرارت در عمق ٤٧٦نانومتر زیر سطح در شکل ۹ آورده شده و با نتایج مرجع [١٦] که مربوط به عمق ٤٨۰نانومتر است، مقایسه شده است (باتوجه‌به اندازهٔ متفاوت مش‌ها و موقعیت گره‌ها در این تحقیق، نزدیک‌ترین گره به عمق ٤٨۰ انتخاب شده است). نتایج به‌دست‌آمده تطابق خوبی با نتایج مرجع[١٦] در مدل‌سازی منبع حرارتی و همچنین رفتار حرارتی ماده در اثر تابش پرتو لیزر نشان می‌دهد. در انجام تحلیل

حرارتی، بعضی خواص ماده مستقل از دما فرض شده است که این امر می‌تواند دلیل اختلاف اندکی باشد که در شکل ۹ دیده می‌شود.

شکل ۱۰ توزیع حرارت در منطقه لیزر در زمان ۱۱۸۰نانوثانیه پس از تابش لیزر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، منطقه متأثر از حرارت، به‌سرعت گرمای خود را از دست می‌دهد و دمای آن در عرض ۱۱۷٤نانوثانیه از ٥٦٩۲درجه سانتی‌گراد به ۳۰۹درجه سانتی‌گراد می‌رسد.



شکل ۱۰ توزیع حرارت در منطقه تابش لیزر ۱۱۸۰نانوثانیه پس از شلیک لیزر با توان ۱۰میلی‌ژول و خیزپالس ٥نانوثانیه

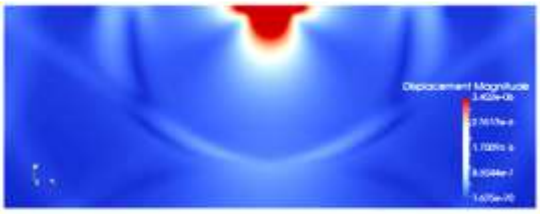
برای مقایسهٔ نتایج مکانیکی با داده‌های تجربی ریسه و همکاران [15] از لیزری با توان کمتر از ۳/۹میلی‌ژول استفاده و نحوهٔ انتشار موج فراصوتی حاصل از انبساط آنی سطح استخراج شد. شکل ۱۱ انتشار این موج را در داخل قطعه‌ای از زمان ۳۰۰ تا ۱۰٥۲نانوثانیه پس از شلیک پرتو لیزر نشان می‌دهد. شکل‌های ۱۱–ب و ۱۱–د به‌ترتیب مربوط به لحظه رسیدن موج طولی و عرضی به کف قطعه هستند.



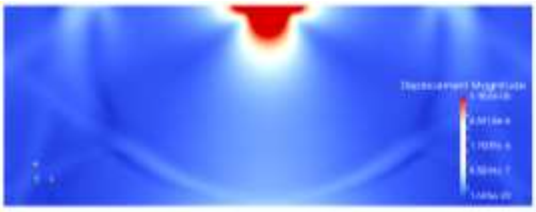
الف)



ب)



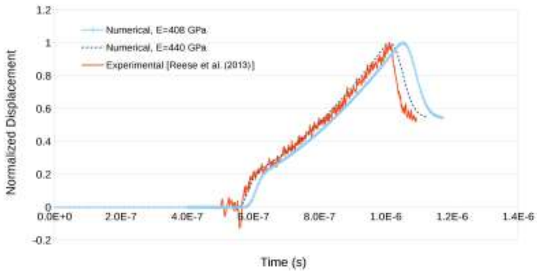
ج)



د)

شکل ۱۱ نحوه انتشار موج فراصوتی ایجادشده در زمان الف) t=۳۰۰ ns ب) t=٥٧٤ ns ج) t=۸٤۰ ns د) t=۱۰٥۲ ns درون قطعه تنگستنی، برای لیزر Nd:YAG با توان ۳/۹ میلی‌ژول و خیزپالس ٥ نانوثانیه و شعاع لکهٔ ۰/۳٥٤ میلی‌متر

شکل ۱۲ نمودار جابه‌جایی برحسب زمان برای نقطه‌ای در کف قطعه و در مرکز تابش پرتو لیزر را نشان می‌دهد. از زمان شـــلیک پرتو لیزر تا لحظه t=٥٧٤ ns منحنی افقی است و جابه‌جایی تقریبا صفر است. باتوجه‌به اینکه سرعت موج طولی بیشتر از سرعت موج عرضی است، اولین جابه جایی نمودار که تقریباً در لحظه t=٥٧٤ ns م شاهده می شود، مربوط به ر سیدن موج طولی به کف قطعه است. شکستگی دوم نمودار، رسیدن موج عرضی به کف قطعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲ نمودار جابه‌جایی برحسب زمان برای نقطه‌ای در کف قطعه و در مرکز تابش لیزری با توان ۳/۹میلی‌ژول و خیزپالس ۵نانوثانیه

زمان رسیدن موج عرضی در تحلیل اجزای محدود ۱۰۵۲نانوثانیه و در آزمایش‌های عملی ریسه و همکارانش[15] ۱۰۰۸نانوثانیه است. زمان متناظر برای موج طولی ۵۷٤نانوثانیه در مقابل ٥٦٠نانوثانیه است. مقایسهٔ نتایج، خطایی به میزان ۲/۵درصد برای موج طولی و ٤/٤درصد برای موج عرضی را در محاسبات اجزای محدود نشان می‌دهد. برای مدول یانگ فلز تنگستن در مراجع مختلف اعداد متفاوتی داده شده است. در مرجع[36]، مدول یانگ اندازه‌گیری‌شده برای تنگستن توسط گربریچ و همکاران، ٤٠۷±۸۷/۸ گیگاپاسکال گزارش شده است. بنابراین تحلیل مکانیکی با مدول یانگ‌های مختلف تکرار و مشاهده شد که با مدول یانگ ٤٤٠گیگاپاسکال، نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۱۵] مطابقت بهتری دارد. بنابراین، یکی از علل اختلاف نتایج، ممکن است تفاوت مدول یانگ استفاده‌شده برای تنگستن در انجام محاسبات اجزای محدود با مقدار واقعی آن در آزمایش باشد. همچنین، تطابق خوب نتایج، قابلیت حل‌کننده کد–استر برای تولید امواج فراصوتی حاصل از تابش پرتو لیزر و صحت مدل‌سازی مکانیکی فراصوت لیزری را تأیید می‌کند.

نتیجه‌گیری

فراصوت لیزری در رژیم دما–ارتجاعی به‌روش اجزای محدود و با استفاده از حل‌کننده کد–استر به‌صورت دوبعدی مدل شد و رفتار حرارتی ماده و همچنین انتشار موج فراصوتی حاصل از تابش یک پرتو لیزر Nd:YAG با طول موج ۵۳۲نانومتر، خیزپالس ۵نانوثانیه و شعاع لکهٔ ۰/۳٥٤میلی‌متر مطالعه شد. در روش اجزای محدود، زمان محاسبات فرایندهای پیچیده بسیار زیاد است و بدین لحاظ یافتن مقدار مورد نیاز اندازهٔ اجزا برای داشتن کمترین زمان انجام محاسبات ضروری است. باتوجه‌به اینکه در مطالعات پیشین، تحلیل حرارتی و مکانیکی برای حل مسئله فراصوت لیزری به‌صورت هم‌زمان و در یک مرحله گزارش شده است، در این تحقیق اندازهٔ اجزای مورد نیاز برای انجام این ۲تحلیل به‌صورت مجزا بررسی شد و باتوجه‌به اختلاف زیاد مقادیر به‌دست‌آمده در تحلیل‌های حرارتی و مکانیکی، پیشنهاد شد که فراصوت لیزری و فرایندهای کوپل حرارتی‌مکانیکی مشابه، در ۲مرحله و با اندازهٔ گام‌زمانی و مش متفاوت برای هر یک از این ۲تحلیل حل شود تا زمان انجام محاسبات کمتر شود.

همچنین، تطابق خوب نتایج تحلیل حرارتی و مکانیکی با داده‌های عددی و آزمایشگاهی موجود، مطمئن‌بودن حل‌کننده کد–استر در تحلیل اجزای محدود مسائل فراصوت لیزری را نشان داد. حل‌کننده کد–استر می‌تواند به‌عنوان حل‌کننده‌ای رایگان و غیرتجاری برای مدل‌سازی امواج فراصوتی با لیزر و فرایندهای مشابه مورد توجه و استفاده قرار گیرد.

فهرست علائم

$[B]^T$	ترانهاده تابع شکل
C	حداکثر سرعت موج در ماده
C_0	ظرفیت گرمای ویژه در دمای اتاق
c_L	سرعت موج طولی
C_p	ظرفیت گرمای ویژه
$C_p(T)$	تابع ظرفیت گرمای ویژه

$[C_p]$	ماتریس ظرفیت گرمایی ویژه
c_T	سرعت موج عرضی
$[D]$	ماتریس ماده
E	انرژی پالس لیزر
$f(x)$	توزیع فضایی پرتو لیزر
$\{F_{ext}\}$	بردار نیروی خارجی
f_{max}	حداکثر فرکانس موج
$g(t)$	توزیع زمانی پرتو لیزر
h	ضخامت قطعه
k	رسانندگی گرمایی
$[K]$	ماتریس سفتی
$[K_T]$	ماتریس رسانندگی گرمایی
L_e	اندازهٔ جزء
L_f	گرمای نهان ذوب
$[M]$	ماتریس جرم
$\{p_1\}$	بردار شار حرارتی
$\{p_2\}$	بردار منبع حرارتی
Q	چگالی انرژی منبع حرارتی
R	ضریب انعکاس سطح
r_0	شعاع لکهٔ لیزر
t	زمان
t_0	زمان خیزپالس لیزر
T	دما
$\{T\}$	بردار دما
$\{\dot{T}\}$	بردار نرخ افزایش دما
T_m	نقطهٔ ذوب ماده
U	جابه‌جایی
$\{U\}$	بردار جابه‌جایی
$\{\ddot{U}\}$	بردار شتاب
x	امتداد طول قطعه
y	راستای عمق
Y	مدول یانگ
α	ضریب انبساط حرارتی خطی
$\{\varepsilon_0\}$	بردار کرنش حرارتی
μ	ثابت لامه
ρ	چگالی
ν	ضریب پواسون
λ	ثابت لامه

واژه نامه

فراصوت لیزری	Laser ultrasonics
دما-ارتجاعی	Thermoelastic
فرسایشی	Ablation
روش سایه	Shadow method
میرایی	Damping
ماتریس جرم	Mass matrix
گام‌زمانی	Increment size
صریح	Explicit
موج پیشرو	Head wave
موج ریلی	Rayleigh wave

مراجع

1. Monchalin, J. P., “Laser-Ultrasonics: Principles and Industrial Applications”, in: *Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization*, chapter 4, edited by Chen, C. H., World Scientific, New Jersey, pp. 79-115, (2007).
2. Stratoudaki, T., Edwards, C., Dixon, S. and Palmer, S. B., “The role of epoxy resin in the mechanism of laser generated ultrasound in carbon fiber reinforced composites”, Proceedings of SPIE 5046

Conference on Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aerospace Materials and Composites II, pp. 89-98, Bellingham, WA, USA, (2003).

3. Davies, S. J., Edwards, C., Taylor, G. S., and Palmer, B. P., "Laser-generated ultrasound: its properties, mechanisms and multifarious applications", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 26, No. 3, pp. 329-348, (1993).
4. Ledbetter, H. M., and Moulder, J. C., "Laser-induced Rayleigh waves in aluminum", *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 65, No. 3, pp. 840-842, (1979).
5. Viertl, J. R. M., "Frequency spectrum of laser-generated ultrasonic waves", *Journal of Applied Physics*, Vol. 51, No. 1, pp. 805-807, (1980).
6. Rudd, M. J., "Ultrasonic nondestructive evaluation using laser transducers", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation Library of Congress Cataloging in Publication Data*, Vol. 2A, pp. 1763-1782, (1983).
7. Aindow, A. M., Dewhurst, R. J., Palmer, S. B., and Scruby, C. B., "Laser-based non-destructive testing techniques for the ultrasonic characterization of subsurface flaws", *NDT International*, Vol. 17, No. 6, pp. 329-335, (1984).
8. Hutchins, D. A., Young, R. P., and Ungar, J., "Laser-Generated ultrasonic waves for the investigation of porous solids", *Ultrasonic Methods in Evaluation of Inhomogeneous Materials NATO ASI Series*, Vol. 126, pp. 353-365, (1987).
9. Dewhurst, R. J., and Shan, Q., "Through-transmission ultrasonic imaging of sub-surface defects using non-contact laser techniques", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 16, pp. 163-178, (1992).
10. Royer, D., and Chenu, C., "Experimental and theoretical waveforms of Rayleigh waves generated by a thermoelastic laser line source", *Ultrasonics*, Vol. 38, pp. 891-895, (2000).
11. Clorennec, D., Royer, D., and Walaszek, H., "Nondestructive evaluation of cylindrical parts using laser ultrasonics", *Ultrasonics*, Vol. 40, pp. 783-789, (2002).
12. Karabutov, A., Devichensky, A., Ivochkin, A., and Lyamshev, M., "Laser Ultrasonic Diagnostics of Residual Stress", *Ultrasonics*, Vol. 48, pp. 631-635, (2008).
13. Wu, K. T., Jen, C.K., Kobayashi, M., and Blouin, A., "Integrated Piezoelectric Ultrasonic Receivers for Laser Ultrasound in Non-destructive Testing of Metals", *Journal of Nondestructive Eval*uation, Vol. 30, No. 1, pp. 1-8, (2011).
14. Pei, C., Demachi, K., Zhu, H., Fukuchi, T., Koyama, K., and Uesaka, M., "Inspection of Cracks Using Laser-Induced Ultrasound with Shadow Method: Modeling and Validation", *Optics & Laser Technology*, Vol. 44, pp. 860-865, (2012).
15. Reese, S. J., Utegulov, Z. N., Farzbod, F., Schley, R. S., and Hurley, D. H., "Examination of the epicentral waveform for laser ultrasound in the melting regime", *Ultrasonics*, Vol. 53, pp. 799-802,

(2013).

16. Every, A. G., Utegulov, Z. N., and Veres, I. A., "Laser Thermoelastic Generation in Metals above the Melt Threshold", *Journal of Applied Physics*, Vol. 114, No. 20, pp. 203508, (2013).
17. Wang, J. S., Cheng, Y., Xu, X. D., and Liu, X. J., "Laser-Ultrasonic Investigation on Lamb Waves in Two-Dimensional Phononic Crystal Plates", *International Journal of Thermophysics*, Vol. 36, No. 5-6, pp. 1195-1201, (2015).
18. Qiu, Q., and Lau, D., "The sensitivity of acoustic-laser technique for detecting the defects in CFRP-Bonded concrete systems", *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 35, (2016).
19. Ruipeng, G., Haitao, W., and Jianyan, Z., "Non-contact detection of low carbon steel using laser generated ultrasound at high temperature", *Optik*, Vol. 136, pp. 536-542, (2017).
20. Casalino, G., Moradi, M., Moghadam. M. K., Khorram, A., and Perulli, P., "Experimental and numerical study of AISI 4130 steel surface hardening by pulsed Nd: YAG laser", *Materials*, Vol. 12, 3136, (2019).
21. Moradi, M., Moghadam, M. K., Shamsborhan, M., Beiranvand, Z. M., Rasouli, A., Vahdati, M., Bakhtiari, A. and Bodaghi, M., "Simulation, statistical modeling, and optimization of CO2 laser cutting process of polycarbonate sheets" *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, Vol. 225, 164932, (2020).
22. Ji, B., Zhang, Q., Cao, J., Zhang, B. and Zhang, L., "Delamination detection in bimetallic composite using laser ultrasonic bulk waves", *Applied Sciences*, Vol. 11, 636, (2021).
23. Liu, P., Nazirah, A. W., and Sohn, H., "Numerical simulation of damage detection using laser-generated ultrasound", *Ultrasonics*, Vol. 69, pp. 248-258, (2016).
24. Zhang, K., Zhou, Z., Zhou, J., Sun, G., "Characteristics of laser ultrasound interaction with multi-layered dissimilar metals adhesive interface by numerical simulation", *Applied Surface Science*, Vol. 353, pp. 284-290, (2015).
25. Zhou, Z., Zhang, K., Zhou, J., Sun, G., and Wang, J. "Application of laser ultrasonic technique for non-contact detection of structural surface-breaking cracks", *Optics & Laser Technology*, Vol. 73 , pp. 173-178, (2015).
26. Dai, Y., Xu, B. Q., Luo, Y., Li, H., and Xu, G. D., "Finite element modeling of interaction of laser-generated ultrasound with a suface-breaking notch in an elastic plate", *Optics & Laser Technology*, Vol. 42, pp. 693-697, (2010).
27. Li, C., Li, S., Guan, G., Wei, C., Huang, Z., and Wang, R. K., "A comparison of laser ultrasound measurements and finite element simulations for evaluating the elastic properties of tissue mimicking phantoms", *Optics & Laser Technology*, Vol. 44, pp. 866-871, (2012).
28. Liu, P., Nazirah, A. W., and Sohn, H., "Numerical simulation of damage detection using laser-generated ultrasound", *Ultrasonics*, Vol. 69, pp. 248-258, (2016).

29. Arias, I., and Achenbach, J. D., “A model for the ultrasonic detection of surface-breaking cracks by the scanning laser source technique”, *Wave Motion*, Vol. 39, No. 1, pp. 61-75, (2004).
30. Wang, J., Shen, Z., Xu, B., Ni, X., Guan, J., and Lu, J., “Numerical simulation of laser-generated ultrasound in non-metallic material by the finite element method”, *Optics & Laser Technology*, Vol. 39, pp. 806-813, (2007).
31. Veres, I. A., Berer, T., and Burgholzer, P., “Numerical modeling of thermoelastic generation of ultrasound by laser irradiation in the coupled thermoelasticity”, *Ultrasonics*, Vol. 53, pp. 141-149, (2013).
32. Every, A. G., Utegulov, Z. N., and Veres, I. A., “Pulsed laser generation of ultrasound in a metal plate between the melting and ablation thresholds”, AIP Conference Proceedings, Vol. 1650, pp. 1350-1359, Boise, Idaho, USA, (2015).
33. Zhao, Y., Shen, Z., Lu, J., and Ni, X., “A finite element model for laser-induced leaky waves at fluid-solid interfaces”, *Physical Letters A*, Vol. 370, pp. 104-109, (2007).
34. Liu, W., Ma, J., Kong, F., Liu, S., and Kovacevic, R., “Numerical modeling and experimental verification of residual stress in autogenous laser welding of high-strength steel”, *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, Vol. 2, pp. 24-42, (2015).
35. Nezamdost, M. R., Esfahani, M. R. N., Hashemi, S. H., and Mirbozorgi, S. A., “Investigation of temperature and residual stresses field of submerged arc welding by finite element method and experiments”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 67, pp. 615-624, (2016).
36. Huang, H., Wu, Y. Q., Wang, S. L., He, Y. H., Zou, J., Huang, B. Y., and Liu, C. T., “Mechanical properties of single crystal tungsten mirowhiskers characterized by nanoindentation”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 523, pp. 193-198, (2009).

Finite Element Modeling of Laser Ultrasonics Process in Thermoelastic Regime

Salman Shamsaei[1] Farhang Honarvar[2]

1. Introduction

In recent years, laser ultrasonic testing has found many applications in industry. In general, laser ultrasonics is used in either thermoelastic or ablation regime. If the laser power is lower than the material evaporation threshold, the regime is thermoelastic and if the laser power is sufficient for evaporation of the material, the regime is ablation. The advantage of the ablation regime over thermoelastic regime is that it produces stronger signals and makes it possible to inspect thick blocks and high-temperature parts. However, due to the small surface damage induced in ablation regime, its use is limited to certain applications. In this paper, laser ultrasonics in thermoelastic regime was modeled by finite element method and the thermal behavior of the material due to laser beam radiation as well as the propagation of the generated ultrasonic wave was investigated. Due to long computational time in laser ultrasonics process, especially in inspection of thick components, and since the required element size and time increment is different for solving the thermal and mechanical aspects of the problem, these two sections were modeled separately. The effect of separating these two parts on the reduction of computation time was then examined. First, the element size and time increment required to solve the thermal problem were found by repeating the analysis. These results were then used as input load to mechanical analysis. The results were validated by comparison with other numerical and laboratory results. Furthermore, the capability of the Code-Aster computational solver in modeling the laser ultrasonics process in thermoelastic regime was also evaluated.

2. Numerical Simulations

Code-Aster solver was used to perform finite element calculations. The calculations were divided into two parts: thermal and mechanical. Unlike the common method, a different meshing was used for each of the two analyses. In the first part, the laser pulse radiation on the body surface was modeled and the temperature distribution in the specimen was calculated as a function of time. In the second part, the results of thermal analysis were used as input load to the mechanical analysis and node displacements due to instantaneous surface expansion and ultrasonic wave formation were examined dynamically. A Nd: YAG laser with 5 ns pulse rise time and 0.354 mm spot radius were used in finite element calculations. Two-dimensional calculations were performed on a piece of tungsten with dimensions of $3.12 \times 8\ mm^2$. Due to the symmetry of the test piece along its horizontal axis, only half of the specimen was modeled. Element size is of particular importance in finite element analysis and convergence is achieved when the elements size is sufficiently small. The optimum value is usually found by repeating the analysis while gradually reducing the elements size. In our case, the analysis was repeated several times with different element sizes and the results converged when the elements size in the area close to laser spot reached 100 nm (Figure 1). For the areas away from the laser, the analysis was also repeated several times and each time, the elements were made slightly larger. It was observed that with elements as small as 30 µm or less, the results remain unchanged.

Mechanical analysis does not require such a fine mesh. As Figure 2 shows, by reducing the elements size to 15 µm, the time it takes for the transverse wave to reach at the bottom of the specimen gradually increases and then remains constant. Therefore, this part of the analysis was carried out with an element size of 15 µm.

Another factor affecting the accuracy and computation time is time increment. The higher the laser energy density, the smaller the time increment that is required to solve the problem. For the 3.9 mJ laser, the results converged when using a time increment of 100 ps. Calculations for the 10 mJ laser were performed with a time increment of 50 ps. The cooling step was repeated with the larger time step than the calculated value and no change was observed in results; therefore, time increment of 11.5 ns was used in this step. Mechanical analysis was performed explicitly with a time step of 2 ns and propagation of ultrasonic waves for 1180 ns after laser irradiation was modeled.

[1]. PhD Candidate, NDE Lab, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

[2]. Corresponding author. Professor, NDE Lab, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: honarvar@kntu.ac.ir

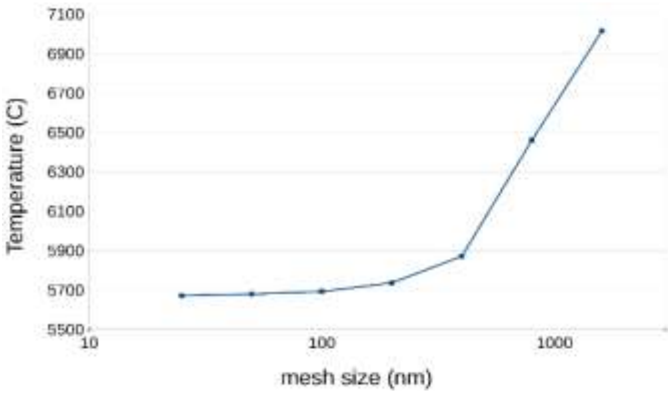


Figure 1. Relationship between elements size (close to laser spot) with temperature at a point above the surface and in the center of the laser beam. The pulse energy is 10 mJ and pulse rise time is 5 ns.

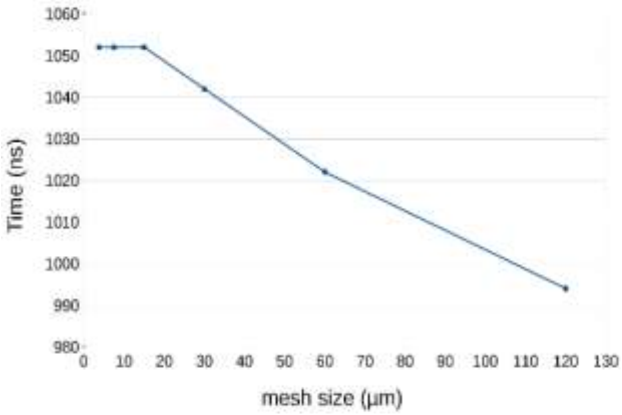


Figure 2. Relationship between element size and the time it takes for the transverse wave to reach the bottom of the specimen in mechanical analysis

Thermal and mechanical computation times with Ubuntu operating system, 2.7 GHz × 8 core i7-6700HQ processor and 16 GB of RAM were 47 and 68 minutes, respectively. The use of different mesh sizes and different time increments for each of thermal and mechanical analyses made the wave propagation problem to be executable in a short time. For comparison, the thermal and mechanical calculations were repeated with identical time steps and mesh sizes. The computation time turned to become several times longer in this case. Thermal analysis took two hours and seven minutes to be completed and mechanical analysis took 11 hours and 29 minutes.

3. Results and Discussion

Variations of temperature as a function of time at a point on the surface and in the center of the laser spot were extracted for a laser with a pulse energy of 10 mJ and a maximum power of 228 MW/cm^2 and compared with numerical results of Every et al. (2013) (Figure 3).

As shown in Figure 3, the results are in good agreement with those reported by Every et al. (2013). To compare our results for the mechanical part of the problem with experimental results of Reese et al. (2013), a laser with a pulse energy of 3.9 mJ was modeled and ultrasonic waves resulting from instantaneous expansion of the surface were extracted. Figure 4 shows the time-displacement diagram for a point at the bottom of the specimen along the laser beam. From the time the laser beam hits the surface until $t = 574$ ns, the curve is horizontal, and the displacement is almost zero. Since longitudinal wave velocity is higher than transverse wave velocity, the initial displacement observed at approximately $t = 574$ ns is due to the arrival of the longitudinal wave at the bottom surface of the test piece. The peak of the diagram also corresponds to the arrival of the transverse wave at the bottom surface. The transverse wave arrival time is 1052 ns in our simulations and 1008 ns in the practical experiments of Reese et al. (2013). The corresponding time for the arrival of longitudinal wave is 574 ns in finite element model vs. 560 ns in experiments.

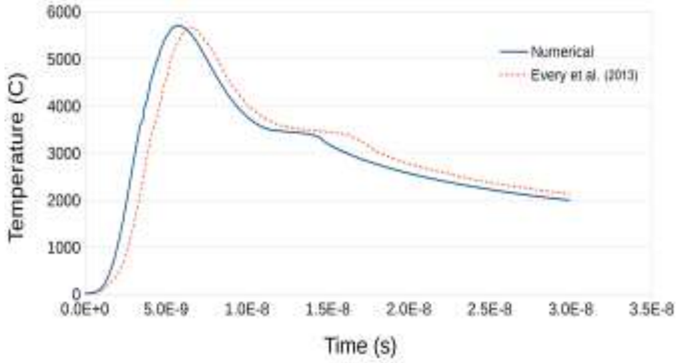


Figure 3. Variations of temperature as a function of time at a point on the surface and in the center of the laser spot were extracted for a laser with a pulse energy of 10 mJ and a pulse rise time of 5 ns

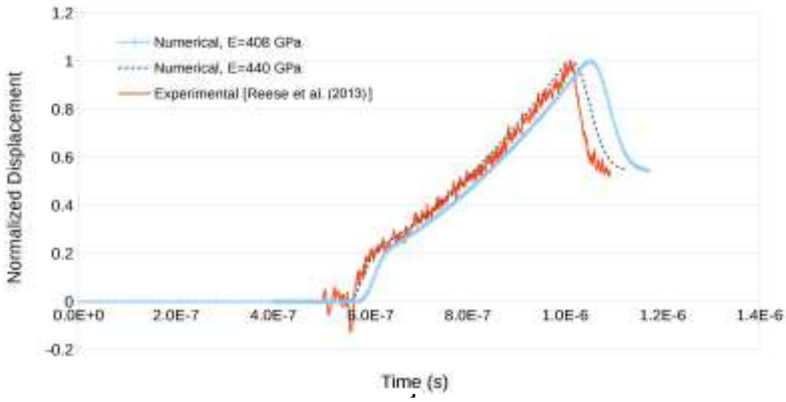


Figure 4. Time-displacement curves for a point at the bottom surface of the specimen along the laser beam. The laser pulse energy is 3.9 mJ and pulse rise time is 5 ns.

Comparison of the results shows an error of 2.5% for the longitudinal wave and 4.4% for the transverse wave. Different values have been used in references for Young's modulus of tungsten. The Young's modulus measured for tungsten by other researchers is reported to be 407±87.8 GPa. Therefore, the mechanical analysis was repeated with different Young's moduli and it was observed that with a Young's modulus of 440 GPa, the simulation results turn out to be in good agreement with experimental results reported by Reese et al. (2013). Therefore, it is likely that one of the reasons for the difference between our simulation results with experiments is the value of the Young's modulus used for tungsten. Good agreement between our numerical results with experiments confirms the capability of the Code-Aster solver in modeling ultrasonic waves generated by laser radiation as well as the accuracy of mechanical modeling of laser ultrasonics.

4. Conclusion

Laser ultrasonics in the thermoelastic regime was modeled in 2D using Code-Aster solver and the thermal behavior of the material as well as the generation of ultrasonic waves by a Nd: YAG laser beam with a wavelength of 532 nm, pulse rise time of 5 ns, and spot radius of 0.354 mm were studied. In the finite element method, the computation time of complex processes is very high and therefore, it is necessary to find the optimized size of elements that results in shortest computation time. In previous studies, thermal and mechanical analyses in solving the problem of laser ultrasonics have been carried out simultaneously and in one step. In this study, the size of the elements required to perform these two analyses were chosen to be different. Due to large differences in element sizes required for thermal and mechanical analyses, it is suggested that laser ultrasonics and similar thermo-mechanical coupling processes be modeled in two stages with different time increments and mesh sizes. This would lead to significant reduction of computation time.

Moreover, good agreement of thermal and mechanical analyses results with both numerical

and experimental results available in the literature indicates that the Code-Aster solver is a good choice for finite element analysis of laser ultrasonics problems. Code-Aster solver is free and non-commercial.